

文章编号: 0253-2239(2005)06-791-4

# 激光外差干涉快速超精密测量模型研究\*

钟 志 谭久彬\*\* 马洪文 孙文法

(哈尔滨工业大学超精密光电仪器工程研究所, 哈尔滨 150001)

**摘要:** 为了精确地描述激光外差干涉在快速超精密测量中的位移测量,建立了激光外差干涉快速超精密测量模型。传统外差干涉测量模型采用舍去高阶误差的方法,便于分析与快速计算,但在快速纳米精度测量中,高阶误差已经影响到测量精度,根据多普勒频移公式,通过分析激光外差干涉的测量原理,在已有的激光干涉测量模型上增加了  $v^2/c$  的积分项,相当于将传统测量模型进行了高阶误差补偿。通过理论分析可知,当最高测量速度为1 m/s,运行位移为3 m时,该测量模型能够减小约18 nm的测量误差,解决了传统测量模型存在的残余误差累计问题,从而为激光外差干涉在快速超精密测量领域的应用提供了一种理论依据。

**关键词:** 光学测量; 激光外差干涉; 快速超精密测量模型; 多普勒频移; 残余误差  
中图分类号: TN247 文献标识码: A

## Study on Fast Ultra-Precision Measurement Model in Laser Heterodyne Interferometry

Zhong Zhi Tan Jiubin Ma Hongwen Sun Wenfa

(Institute of Ultra-Precision Optoelectronic Instrument Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

**Abstract:** In order to describe accurately laser heterodyne interferometer measurement in fast ultra-precision, a new model is proposed. The laser heterodyne interferometer measurement theory is analyzed, and laser interferometer fast ultra-precision model based on the Doppler frequency shift model is deduced. In the model, the integral of  $v^2/c$  is added, the part is ignored in laser heterodyne interferometer conventional model. With this model, when the highest measurement speed is up to 1 m/s and the displacement is up to 3 m, about 18 nm of measurement error is reduced, and the residual error is removed, the fast ultra-precision measurement is realized.

**Key words:** optical measurement; laser interferometry; fast ultra-precision measurement model; Doppler frequency shift; residual error

### 1 引 言

激光外差干涉仪具有测量速度快、测量精度高、抗干扰能力强、重复性好、溯源性强等优点,成为理想的超精密检测及测量仪器<sup>[1]</sup>。激光外差干涉仪广泛应用于各种超精密测量、检测和加工设备中,如金刚石车床、光刻机<sup>[2~4]</sup>等。随着信息装备业的迅速崛起,对大型超精密装备性能的要求越来越高,特别是对精度和效率的要求尤为迫切,如美国 B. S 公司的 Scirocco 三坐标测量机运行速度达到 0.866 m/s<sup>[5]</sup>,这对作为测量单元的激光外差干涉仪

的测量速度和精度提出了更高的要求,故提高激光外差干涉仪的测量速度和精度是超精密制造业发展的需要。目前美国 ZYGO 公司 Demarest F 研制的 ZMI2000 激光干涉仪的测量速度达到了 2.1 m/s,分辨力达到 0.31 nm<sup>[6]</sup>。

为了提高激光外差干涉的测量精度,许多学者对其存在的放置误差、非线性误差、环境误差等进行了广泛深入的研究,已使其测量精度达到亚纳米量级<sup>[7,8]</sup>。随着激光外差干涉测量速度和精度要求的提高,其本身存在的原理性误差已变得不可忽略。

\* 国家自然科学基金(50275041)资助课题。

作者简介: 钟 志(1976~),男,湖南岳阳人,哈尔滨工业大学博士研究生,主要从事激光外差干涉测量与信号处理。

E-mail: zhongzhi@hit.edu.cn

\*\* 通信联系人。E-mail: jbtan@hit.edu.cn

收稿日期: 2004-06-07; 收到修改稿日期: 2004-11-03

Heilmann 等<sup>[9]</sup>近似地建立了激光外差干涉超精密快速测量实时误差模型,但在该模型的建立过程中,存在对计算的近似,不能够精确计算误差的大小,也无法精确描述快速超精密测量模型。为了更精确地描述快速超精密测量模型,本文通过分析激光外差干涉仪的测量原理,从激光外差干涉仪多普勒频移公式出发,推导出其快速超精密测量模型,并相对已有的激光干涉位移测量模型,指出两者之间的差异,并进行仿真验证。

## 2 激光外差干涉仪测量原理

激光外差干涉仪典型测量原理图如图 1 所示<sup>[10]</sup>。激光光源发出两束振动方向相互垂直频率分别为  $f_1$  和  $f_2$  的线偏振光,通过分光镜 2,一部分光通过  $\lambda/4$  波片 6 后在光电接收器 9 上形成参考信号  $f_1 - f_2$ ,另一部分激光通过偏振分光镜 3 被分成两束,其中一束频率为  $f_1$  的线偏振光通过参考棱镜 5 返回到偏振分光镜 3 上,另一束频率为  $f_2$  的线偏振光通过测量棱镜 4 反射返回到偏振分光镜 3,当测量棱镜 4 以速度  $v(t)$  移动时,根据多普勒效应,返回光波的频率为

$$f_2 + \Delta f_2 = f_2 \sqrt{\frac{c+2v}{c-2v}}, \quad (1)$$

其中  $c$  为光在空气中的传播速度。返回的两束激光通过  $\lambda/4$  波片 7 后在光电接收器 10 上形成测量信号  $f_1 - f_2 + \Delta f_2$ 。将上式进行级数展开,取 1 阶无穷小项得

$$f_2(t) = f_2 + \Delta f_2 = f_2 \left[ 1 - \frac{2v(t)}{c} \right], \quad (2)$$

根据数学公式,通过对速度的积分,测量棱镜运动的位移为

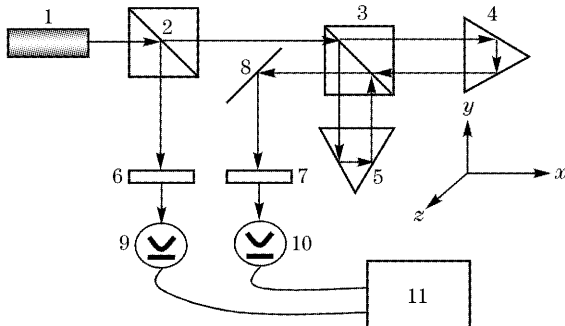


图 1 外差激光干涉仪原理框图

Fig. 1 Schematic diagram of heterodyne laser interferometer

$$x(t) = \int_0^t v(t') dt' = \int_0^t \frac{f_2 - f_2(t')}{2f_2} c dt' = - \int_0^t \frac{\Delta f_2}{2f_2} c dt' = - \frac{N\lambda}{2}, \quad (3)$$

其中  $\Delta f_2 = \frac{2v(t)}{c} f_2$ ,  $\lambda$  为激光波长,  $N$  为干涉条纹变化周期数。上式即为激光外差干涉传统测量模型,可以看出,在进行计算的过程中,存在对高阶误差的舍去,当测量速度较大时,不能精确地描述激光外差干涉测量。

## 3 激光外差干涉快速超精密测量模型

将(1)式中的  $f_2 + \Delta f_2$  进行级数展开,取  $v/c$  的 2 阶无穷小项,得

$$f_2 + \Delta f_2 = f_2 \left[ 1 - 2 \frac{v}{c} + 2 \left( \frac{v}{c} \right)^2 - o \left( \frac{v}{c} \right)^3 \right], \quad (4)$$

可以看出,在计算公式(2)时存在近似,其带来的原理性残余误差为

$$\Delta x(t) = - \int_0^t \frac{v(t')^2}{c} dt', \quad (5)$$

当最高测量速度为 1 m/s,运行位移为 3 m,其误差大小约为 18 nm,而且存在累计现象,这在超精密测量中是致命的。因此作为精确的描述激光干涉仪快速超精密测量模型,其  $v/c$  的 2 次项不能够忽略。

将(4)式中  $v/c$  的 2 阶无穷小项忽略,简化整理,可得

$$2 \left( \frac{v}{c} \right)^2 - 2 \frac{v}{c} - \frac{\Delta f_2}{f_2} = 0, \quad (6)$$

将上式看成一元二次方程,速度的解为

$$v(t) = \frac{c}{2} \left( 1 - \sqrt{1 + \frac{2\Delta f_2}{f_2}} \right), \quad (7)$$

因测量棱镜的速度不可能超过或接近光速故将另一解舍去。将  $\sqrt{1 + 2\Delta f_2/f_2}$  进行级数展开,取  $\Delta f_2/f_2$  的 2 阶无穷小项,代入(7)式中,整理得

$$v(t) = - \frac{c}{2} \left( \frac{\Delta f_2}{f_2} - \frac{\Delta f_2^2}{2f_2^2} \right), \quad (8)$$

根据数学中位移与速度的关系,通过积分,即

$$x(t) = \int_0^t v(t') dt', \quad (9)$$

有

$$x(t) = - \int_0^t \frac{\Delta f_2}{2f_2} c dt' + \int_0^t \frac{\Delta f_2^2}{4f_2^2} c dt', \quad (10)$$

即

$$x(t) = -\frac{N\lambda}{2} + \int_0^t \frac{\Delta f_2^2}{4f_2^2} c dt' = x_1(t) + x_2(t), \quad (11)$$

可以看出,相对已有的激光干涉位移测量公式(3),快速超精密激光干涉位移测量公式增加了  $x_2(t)$  部分,即

$$x_2(t) = \int_0^t \frac{\Delta f_2^2}{4f_2^2} c dt', \quad (12)$$

将  $\Delta f_2 = \frac{2v(t)}{c} f_2$  代入(12)式,得

$$x_2(t) = \int_0^t \frac{v^2(t')}{c} dt', \quad (13)$$

代入(11)式中,激光干涉快速超精密位移测量模型为

$$x(t) = -\frac{N\lambda}{2} + \int_0^t \frac{v^2(t')}{c} dt' = x_1(t) + x_2(t), \quad (14)$$

其中  $x_1(t)$  为已有激光外差干涉传统测量模型求得的位移,  $x_2(t)$  为新增加的位移。当测量速度较低且

测量精度要求较低时,模型(14)可以忽略  $x_2(t)$  部分,从而与(3)式相同;当测量速度为1 m/s,运行位移为3 m,(3)式相对(14)式存在约18 nm的测量误差,而且存在累计现象,这在超精密快速激光外差干涉测量中变得不可忽略,因此  $x_2(t)$  部分将不可忽略。

为了验证快速超精密位移测量模型相对已有的位移测量模型在快速超精密测量中的效果,本文进行了如下仿真实验,实验结果如图2所示,其中运行的时间均为16 s,其中测量棱镜来回运动两次,图2(a)为设定的速度曲线图,其最高速度分别为1 m/s、0.8 m/s、0.5 m/s、0.3 m/s、0.1 m/s。图2(b)为在不同速度条件下快速超精密位移测量模型中的  $x_1(t)$  部分,即根据(3)式所计算的位移;图2(c)为快速超精密位移测量模型中  $x_2(t)$  的部分,即在传统的位移测量模型基础上增加的位移部分。可以看出,相对传统的激光外差干涉测量模型,速度越快,快速超精密位移测量模型减小地测量误差越大,同时解决了传统位移测量模型中残余误差的累计问题。

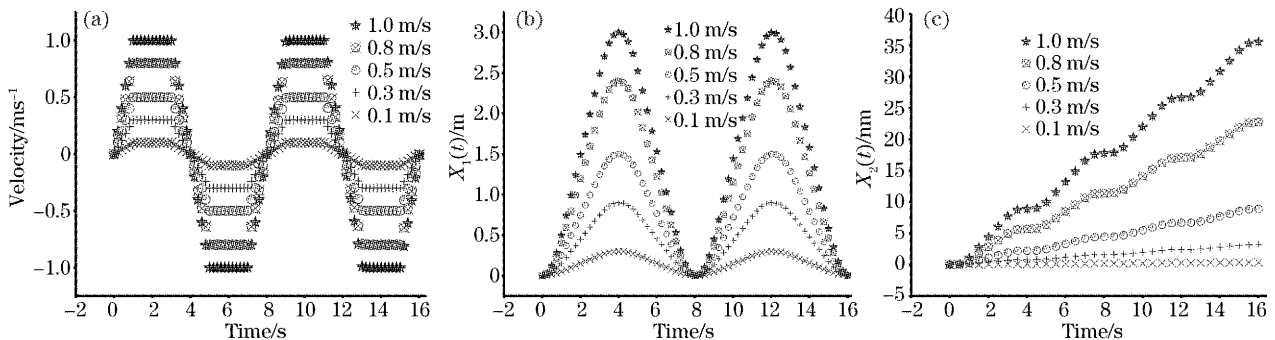


图2 快速超精密位移测量模型不同速度下各部分仿真图。(a)速度时间图,(b)根据(3)式计算的位移曲线,(c)在传统公式上增加的位移曲线

Fig. 2 The simulation results under different velocity. (a) The velocity vs time, (b) the displacement based on the Eq. (3), (c) the displacement added vs. tradition model

在快速超精密位移测量模型计算过程中,忽略了  $v/c$  的3次项,其所带来的误差为测量位移的16阶无穷小项,而激光外差干涉仪中氦氖激光器的频率稳定度最高的为  $10^{-13}$ [11],因此,在快速超精密测量场合,相对已有的激光干涉传统位移测量模型,应用快速超精密位移测量模型能够更准确的测量出激光干涉仪测量棱镜运行位移。

## 4 结 论

通过对激光干涉仪测量原理分析,在激光多普勒频移公式的基础上,推导了激光外差干涉快速超

精密位移测量模型,通过理论分析,得到如下结论:1)当测量速度为1 m/s,运行位移为3 m,快速超精密位移测量模型能够减小约18 nm测量误差;2)应用该模型能够消除残余误差的累加问题,提高了激光外差干涉快速超精密测量的精度。本研究为激光外差干涉快速超精密测量提供了理论基础。

## 参 考 文 献

- 1 Yeh Hsien-Chi. Technical elements of nanometrology [J]. *Publications of Yunnan Observatory*, 2002, (3): 101~116 (in Chinese)
- 叶贤基. 纳米计量学的基础技术组件 [J]. *云南天文台台刊*, 2002, (3): 101~116

- 2 Mark L. Schattenburg, Henry I. Smith. The critical role of metrology in nanotechnology [C]. *Proc. SPIE*, 2002, **4608**: 116~124
- 3 Chen Xiaomei, Gao Hang, Zhou Zili. Design of a laser heterodyne interferometer for 2-D nanometer scale measurement [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1998, **25**(1): 18~22 (in Chinese)  
陈晓梅,曹航,周自力等. 纳米级二维激光外差干涉仪的设计 [J]. *光电工程*, 1998, **25**(1): 18~22
- 4 Zhao Hui, Pu Zhaobang, Liu Guodong. High precision straightness device based on double frequency laser interference technique [J]. *Chin. J. Lasers*, 2001, **A28**(7): 637~640 (in Chinese)  
赵辉,浦昭邦,刘国栋. 基于双频激光干涉技术的高精度直线度基准装置 [J]. *中国激光*, 2001, **28**(7): 637~640
- 5 Gao Sai, Yin Chunyong. High measurement speed dual frequency laser interferometer [J]. *Optical Technique*, 2001, **27**(3): 238~239 (in Chinese)  
高赛,殷纯永. 高测速双频激光干涉仪 [J]. *光学技术*, 2001, **27**(3): 238~239
- 6 Frank C. Demarest. High-resolution, high-speed, low data age uncertainty, heterodyne displacement measuring interferometer electronics [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 1998, **9**(7): 1024~1030
- 7 Dai Gaoliang, Chao Zhixia, Yin Chunyong *et al.*. Determining the residual nonlinear error of a dual-frequency interferometer for nanometrology [J]. *Chin. J. Lasers*, 1999, **A26**(11): 987~992 (in Chinese)  
戴高良,晁志霞,殷纯永等. 纳米精度双频激光干涉仪非线性误差的确定方法 [J]. *中国激光*, 1999, **A26**(11): 987~992
- 8 Attilio Sacconi, Gian Bartolo Picotto, Walter Pasin. The IMGc calibration setup for micro displacement actuators [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1999, **48**(2): 483~487
- 9 R. K. Heilmann, P. T. Konkola, C. G. Chen *et al.*. Relativistic corrections in displacement measuring interferometry [J]. *J. Vac. Sci. Technol.*, 2000, **B18**(6): 3277~3281
- 10 TaeBong Eom, TaeYoung Choi, KeonHee Lee *et al.*. A simple method for the compensation of the nonlinearity in the heterodyne interferometer [J]. *Measurement Science and Technol.*, 2002, **13**(2): 222~225
- 11 Yin Chunyong. *Modern Interfero-Metric Measuring Technique* [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 1999. 104~105 (in Chinese)  
殷纯永. *现代干涉测量技术* [M]. 天津: 天津大学出版社, 1999. 104~105